

doi:10.3788/gzxb20144310.1010002

高动态范围激光焦斑测量数学模型研究

王拯洲^{1,2}, 王伟¹, 夏彦文³

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

(3 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要:提出了一种高动态范围的激光焦斑测量方法. 首先, 构建纹影测量远场焦斑数学模型, 确定重构需要的参数, 并使用准直光路对参数进行标定; 其次, 运用综合诊断快速自动准直系统使纹影小球遮挡住旁瓣光斑中心, 获得准确的旁瓣光斑; 最后, 改进计算纹影小球中心及图像融合等方面的纹影重构算法, 克服了传统纹影重构方法中主瓣旁瓣中心误差大、合并图像拼接边缘台阶明显的缺点. 对大型激光装置参数测量综合诊断系统的远场焦斑测量应用表明: 通过对纹影测量远场焦斑数学模型中参数的精确标定以及对纹影重构算法的优化, 能够实现高动态范围激光焦斑的准确测量.

关键词:高动态范围; 远场焦斑测量; 快速准直; 纹影法; 主瓣; 旁瓣; 纹影重构

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1010002-7

Mathematical Model for the Measurement of High Dynamic Range Laser Focal Spot

WANG Zheng-zhou^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, XIA Yan-wen³

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(3 Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: A measurement method of the high dynamic range laser focal spot was proposed. First of all, the mathematical model of schlieren method to measure the far-field focal spot was constructed, the main lobe intensity amplification coefficient and the laser spot amplification coefficient were confirmed, and the parameters were calibrated by automatic alignment laser beam; Secondly, the schlieren ball was put in focus position of side lobe laser beam to shade the spot centre and side lobe image was captured accurately by integrated diagnostic beam fast automatic alignment system; Finally, the schlieren reconstructed algorithm was optimized by calculating side lobe image centre and image fusion, and the error of traditional schlieren reconstruction method for side lobe center was decreased and the obvious edge of reconstructed image was eliminated. The application in parameter measurement integrated diagnostic system of the high power laser facility to measure far-field laser focal spot shows that the method can measure the far field distribution of high dynamic range laser focal spot exactly if the parameter of the mathematical model is calibrated accurately and the schlieren reconstructed algorithm is optimized.

Key words: High dynamic range; The measurement of far-field focal spot; Fast automatic alignment; Schlieren method; Main lobe; Side lobe; Schlieren reconstruction

OCIS Codes: 100.2000, 120.1680, 120.4640, 120.4820, 130.3120

基金项目: 国家(863)高技术研究与发展计划(No. 051Z331BOA)资助

第一作者: 王拯洲(1976-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理. Email: azhou_china@126.com

导师(通讯作者): 夏彦文(1972-), 男, 副研究员, 主要研究方向为激光参数诊断. Email: xiayanwen1972@163.com

收稿日期: 2014-02-10; 录用日期: 2014-04-11

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

激光的远场焦斑分布是高功率激光装置光束质量的主要指标,也是物理实验至关重要的关键参数.焦斑分布直接反映了强激光的可聚焦能力,关系到激光能否顺利通过物理靶孔.因此,获取焦斑的形态分布和能量集中度来选择合适的物理靶,为改善焦斑质量以适应物理靶的要求提供依据.

研究表明,随着功率的提高^[1-3],焦斑角分布向大角度(即“旁瓣”)发散,当功率由 1TW 增加到 4TW 时,发散角 $\pm 33 \mu\text{rad}$ 之外的能量份额由 1% 提高到 4.5%.要获得如此高的对比度数据必须要求测试系统具有很高的动态范围.强激光远场焦斑分布的高动态范围测量一直是大型激光装置激光参数测量中的一大难点,是高功率物理实验中迫切需要解决的关键技术.目前,对于高动态范围焦斑的测量方法主要有列阵相机法、衍射光栅法、纹影法等.列阵相机法^[4]是对不同曝光的多幅图像的配准来合成高动态范围图像,而综合诊断系统是高通量的打靶实验,很难对一次打靶实验进行多次曝光.由贺元兴等提出的基于衍射光栅的远场焦斑重构方法^[5]在不加光栅时,旁瓣被噪声淹没无法测量;在加入光栅时,主瓣必须挡住才能测到旁瓣光斑;由于主瓣旁瓣光斑在同一界面上,主瓣的遮挡对于旁瓣图像影响很大,使得主瓣旁瓣数据很难分离.目前,对超强激光远场焦斑分布进行测量主要采用纹影法^[6],即主瓣、旁瓣分开测量,用纹影挡光测旁瓣,主瓣放大,拼接实现高动态范围的焦斑测量的方法.该方法主要存在两个困难:一是焦斑主瓣和旁瓣光能量密度相差悬殊,没有如此大动态范围的探测器;二是激光远场漂移使得主瓣和旁瓣分离测量方法难以实现准确拼接.程娟等^[6-8]只是对纹影远场测量的原理做了简单介绍,没有详细的重构算法.

为了实现高动态范围的激光焦斑测量,本文在构建纹影测量远场焦斑数学模型的基础上,确定了重构需要的参数,并使用准直光路对参数进行标定;再使用综合诊断快速自动准直系统对光路进行自动准直,获得了准确的旁瓣光斑;最后纹影重构算法,计算纹影小球中心以及图像融合改进实现了高功率激光远场焦斑的高动态范围测量.该方法的优点是主瓣和旁瓣分开测量,能够根据各自光路的衰减来扩大测量光斑的能量范围,在综合诊断系统中测量的动态范围理论设计值为 1000~10000,其他测量方法无法满足其要求.

1 纹影法测量远场原理

纹影法测量远场焦斑光路如图 1.光束经过分光镜后分成两束,将纹影小球放在旁瓣光路的焦点位置

以挡住光斑中心,旁瓣 CCD 得到的光斑是纹影小球周围的光斑信息,称为“旁瓣”.而将光束经过适当衰减,主瓣 CCD 得到的是没有遮挡的光斑,称为“主瓣”.再将一个望远镜系统和望远小球放在分光镜前的光路中,用来标定主瓣光强放大系数 K 和光斑放大系数 b ,最后通过对主瓣和旁瓣光斑的重构,得到焦斑相对强度的完整分布.

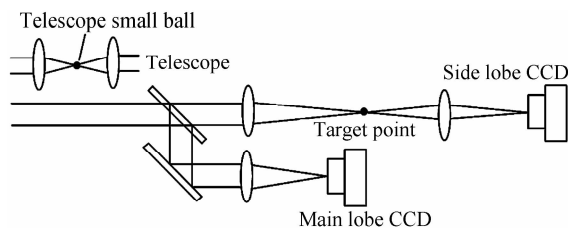


图 1 纹影测量远场焦斑示意图

Fig. 1 Schematic of far field measured by schlieren method

1.1 数学模型

整个纹影测量远场焦斑的数学模型流程如图 2,假设原始焦斑强度分布函数为 $g(x, y)$, x, y 为焦平面的笛卡尔坐标,经过分光镜后分成两路,进行各自的衰减、放大成像,到达主瓣和旁瓣 CCD 上的像面光强分布为

$$f_1(x, y) = k_1 g(\alpha x, \alpha y) \quad (1)$$

$$f_2(x, y) = k_2 g(\beta x, \beta y) \quad (2)$$

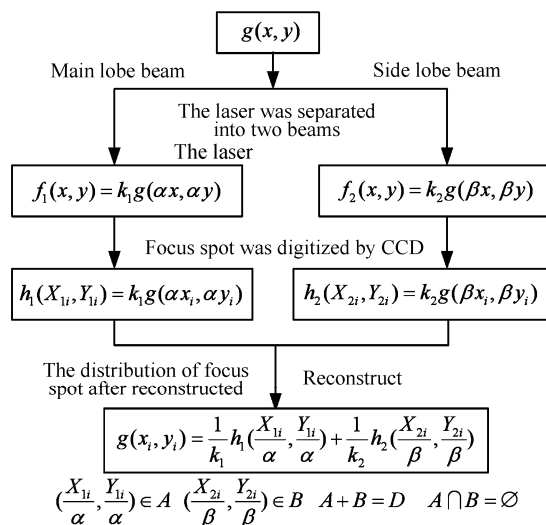


图 2 纹影测量远场焦斑数学模型

Fig. 2 The mathematical model of schlieren method to measure the far-field focus spot

图 2 中, k_1 和 α 分别为主瓣光路的能量衰减系数和光路焦斑横向放大系数, k_2 和 β 分别为旁瓣光路的能量衰减系数和光路焦斑横向放大系数.经 CCD 量化后转化为离散强度分布,即

$$h_1(X_{1i}, Y_{1i}) = k_1 g(\alpha x_i, \alpha y_i) \quad (3)$$

$$h_2(X_{2i}, Y_{2i}) = k_2 g(\beta x_i, \beta y_i) \quad (4)$$

式中, $X_{1i}, Y_{1i}, X_{2i}, Y_{2i}$ 分别为主瓣和旁瓣 CCD 像元数值量化后的笛卡尔坐标, (x_i, y_i) 为坐标 (x, y) 的量化

值,由于放大系数不同,而 CCD 的像元尺寸是相同的,因此主瓣和旁瓣 CCD 像素对应的 x_i, y_i 取不同的量化值。

在图像拼接时,主瓣和旁瓣分别取不同的区域, $(X_{1i}/\alpha, Y_{1i}/\alpha) \in Z_1, (X_{2i}/\beta, Y_{2i}/\beta) \in Z_2$, 两个区域没有重叠,满足 $Z_1 \cap Z_2 = \phi$, 拼接后应充满整个视窗区域 $D, Z_1 \cup Z_2 = D$, 重构可以用函数表示为

$$g(x_i, y_i) = \frac{1}{k_1} h_1\left(\frac{X_{1i}}{\alpha}, \frac{Y_{1i}}{\alpha}\right) + \frac{1}{k_2} h_2\left(\frac{X_{2i}}{\beta}, \frac{Y_{2i}}{\beta}\right) \quad (5)$$

为了简化重构函数,以旁瓣图像为基准进行合并,则旁瓣相对主瓣横向放大系数 $b = \alpha/\beta$, 而主瓣相对旁瓣的光强放大系数 $K = k_1/k_2$. 为了消除合并图像在拼接边缘的灰度差,需要设置宽度为 20 像素的过渡区域 $C, A = Z_1 - C_1, B = Z_2 - C_2, C_1 + C_2 = C$. 所以,重构图像可以简化为

$$h(x_i, y_i) = \begin{cases} Kh_1(bx_i, by_i) & (x_i, y_i) \in A \\ h_2(x_i, y_i) & (x_i, y_i) \in B \\ d_1 Kh_1(bx_i, by_i) + d_2 h_2(x_i, y_i) & (x_i, y_i) \in A \cap B = C \neq \phi \end{cases} \quad (6)$$

式中 A 区域为主瓣光斑填充区域, B 区域为旁瓣光斑填充区域, 而 C 为主瓣光斑和旁瓣光斑的重叠区域, 即过渡带, 如图 3 所示. d_1 和 d_2 代表重叠区域主瓣和旁瓣图像所占的比例, 且 $d_1 + d_2 = 1, 0 < d_1 < 1, 0 < d_2 < 1$.

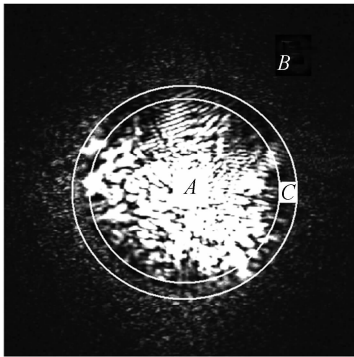


图 3 纹影重构区域示意图

Fig. 3 Reconstructed region of schlieren method

1.2 标定原理

采用如图 1 所示的远场焦斑测量光路, 首先对主瓣光强放大系数 K 和光斑放大系数 b 进行标定, 然后计算纹影小球中心, 利用标定后的系数来计算纹影小球中心在主瓣图像上的对应位置, 其中标定方法如下

1) 用望远小球标定两 CCD 的相对位置. 将纹影小球推出光路, 望远准直系统推出光路, 则望远小球在旁瓣 CCD 和主瓣 CCD 所成的像中心坐标分别为 (A_{1X}, A_{1Y}) 和 (B_{1X}, B_{1Y}) , 如图 4 所示, 左图为主瓣光斑, 右图为主瓣光斑。

2) 将望远小球偏移一定位置, 则在旁瓣和主瓣 CCD 上成像的新坐标分别为 (A_{2X}, A_{2Y}) 和 (B_{2X}, B_{2Y}) ,

则主瓣 CCD 相对旁瓣 CCD 的放大比例 b 为

$$b = \frac{\sqrt{(B_{2X} - B_{1X})^2 + (B_{2Y} - B_{1Y})^2}}{\sqrt{(A_{2X} - A_{1X})^2 + (A_{2Y} - A_{1Y})^2}} \quad (7)$$

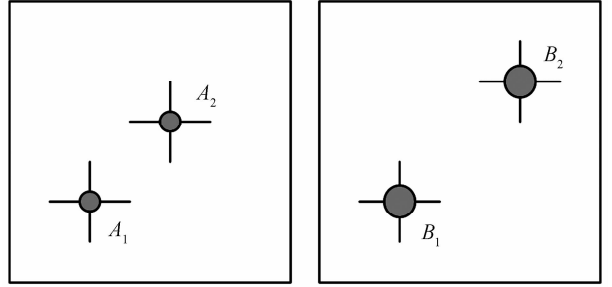


图 4 放大比例标定示意图

Fig. 4 The calibration of amplificatory ratio

3) 将纹影小球推入光路, 望远准直系统推出光路, 根据小球中心确定纹影中心坐标为 (A_{2X}, A_{2Y}) , 如图 5 所示. 假设 $\Delta x_1, \Delta y_1$ 分别为旁瓣图像纹影小球中心 X 和 Y 方向与基频的偏差, 则对应主瓣 XY 方向的偏移量为

$$\begin{cases} \Delta x_2 = \Delta x_1 \times b \\ \Delta y_2 = \Delta y_1 \times b \end{cases} \quad (8)$$

式中. 假设主瓣 XY 方向和旁瓣 XY 方向一致, 则主瓣图像中心, 即纹影小球中心在主瓣图像中对应位置的坐标为

$$\begin{cases} B_{2X} = B_{1X} + \Delta x_2 \\ B_{2Y} = B_{1Y} + \Delta y_2 \end{cases} \quad (9)$$

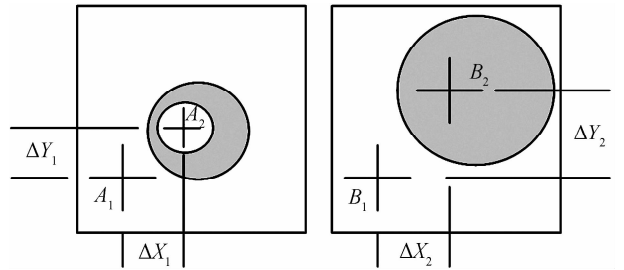


图 5 光路标定法

Fig. 5 The method of laser beam calibration

用该方法计算得到的 B_2 坐标即为纹影小球中心在主瓣图像中的对应点, 避免了使用纹影小球不在旁瓣中心时, 将主瓣图像重心当作纹影小球中心在主瓣图像中对应位置的缺点。

4) 标定放大系数 K . 将一个标准光源放入望远小球位置, 重复测量多次, 则旁瓣图像去本底后的平均灰度除以主瓣图像减去本底后的平均灰度为放大系数 K .

5) 通过对重构图像重叠区域数据的比较, 如果相对偏差小于 0.05, 则表示误差在可控范围之内, 满足打靶实验的要求。

2 综合诊断快速自动准直系统

在获得标定参数后, 主要的任务就是准确测量主

瓣和旁瓣光斑. 由于旁瓣光斑需要纹影小球对旁瓣中心进行遮挡, 所以需要对准直, 才能获得中心

被遮挡的旁瓣光斑. 为了获得主瓣旁瓣光斑, 设计了综合诊断快速自动准直系统, 光路原理图如图 6.

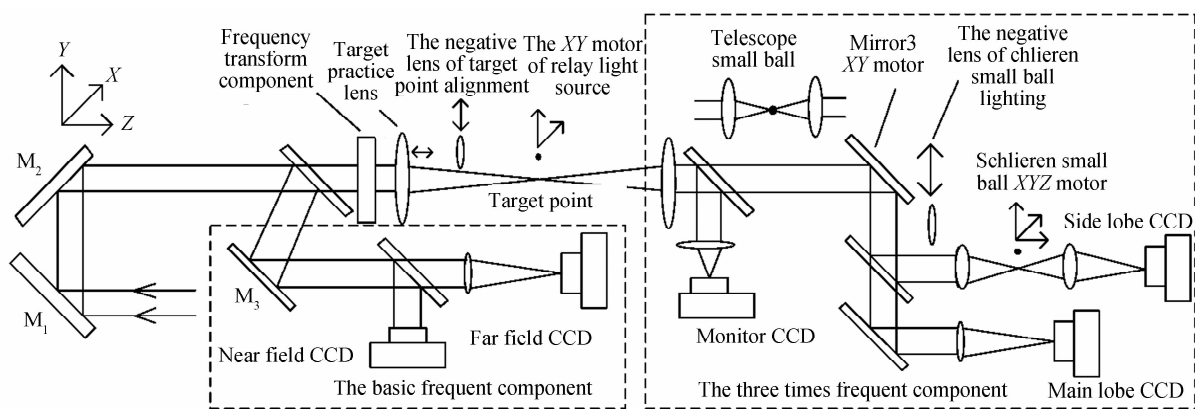


图 6 综合诊断光路

Fig. 6 Optical schematic of integrated diagnostic system

综合诊断系统是一个包含光学取样组件、探测元器件、伺服系统、监视系统、控制系统等系统的闭环调控监视系统, 位于主机装置的末端. 为了在打靶阶段准确测量到主旁瓣数据, 需要在预发射阶段对光路进行自动准直. 该系统通过一套自动准直系统来对主、旁瓣光路调节, 以保证它的同轴性. 准直主要分为两个区域: 基频光准直和三倍频光准直; 前者将抽样激光束准直到模拟靶点, 后者将模拟靶点上的激光远场光斑准确成像到探测 CCD 上, 以便获得焦斑的正确形态分布.

整个光路共有两个光源, 在光路中的靶点前使用模拟光源, 由于模拟光能量比较小, 无法准确测量旁瓣和主瓣, 所以靶点位置增加接力光源来替代模拟光源来完成三倍频组件光路的准直. 只有在准直阶段完全将主瓣和旁瓣光路同轴, 才能准确测量出主瓣和旁瓣光斑, 为重构靶点远场焦瓣提供条件. 通过综合诊断系统获得的旁瓣光斑和主瓣光斑如图 7.

3 纹影重构步骤

纹影重构算法分为 4 个步骤: 1) 计算纹影小球中

心; 2) 计算纹影小球中心在主瓣光斑上的对应点; 3) 主瓣和旁瓣图像合并; 4) 边界融合.

3.1 使用圆拟合法计算纹影小球中心

计算纹影小球中心时, 先要获得纹影小球的边缘, 然后利用最小二乘法进行圆拟合, 以提高拟合精度. 读取旁瓣、主瓣光斑, 如图 7 所示, 先对旁瓣、主瓣光斑进

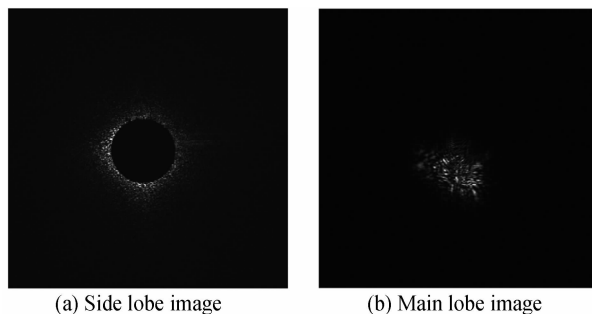


图 7 原始光斑

Fig. 7 The original laser spot

行去噪处理, 使用大津法进行二值化处理^[10], 对二值化图像进行形态学开运算^[10], 使用 Sobel 算子进行边缘检测^[11]. 根据文献[9]圆拟合公式为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(\overline{x^2x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})((\overline{y^2} - \overline{y^2}) - (\overline{x^2y} + \overline{yy^2} - \overline{x^2y} - \overline{y^3})(\overline{xy} - \overline{xy}))}{2((\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2)} \\ y_0 = \frac{(\overline{x^2y} + \overline{yy^2} - \overline{x^2y} - \overline{y^3})(\overline{x^2} - \overline{x^2}) - (\overline{x^2x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{xy} - \overline{xy})}{2((\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2)} \\ r = \sqrt{x_0^2 - 2\overline{xx_0} + y_0^2 - 2\overline{yy_0} + \overline{x^2} + \overline{y^2}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{式中 } \overline{x^m y^n} = \frac{1}{N} \sum_{i \in E} x_i^m y_i^n \quad (13)$$

N 为检测到的圆轮廓点的个数, (x_i, y_i) 为图像的边界坐标, x_0, y_0 为拟合出的圆心坐标, r 为半径. 计算的纹影小球圆心为 (494.9, 517.6), 记作 (pbx, pby) , 半径为 113.15, 记作 pbr . 通过圆拟合法计算圆心和真实

圆心的误差为 (0.2, 0.1), 而重心法和真实圆心的误差为 (1.0, 0.9). 由此可以看出, 圆拟合算法比重心法算法更优, 计算得到的旁瓣光斑中心更准确, 更能保证重构图像的真实性.

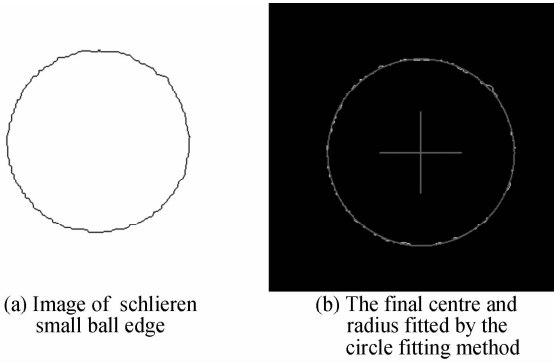


图8 圆拟合法计算纹影小球中心
Fig. 8 To calculate the schlieren small ball by circle fitting method

3.2 计算纹影小球中心在主瓣光斑上的对应点

旁瓣标定中心 (A_{1X}, A_{1Y}) 为 $(493, 511.89)$,而主瓣标定中心 (B_{1X}, B_{1Y}) 为 $(490.8, 581)$,计算得到的纹影小球中心 (A_{2X}, A_{2Y}) 为 $(494.9, 517.6)$,主瓣光斑相对旁瓣光斑的放大系数 $b=1.15$,则纹影小球中心在主瓣光斑上的对应点 (B_{2X}, B_{2Y}) 由式(2)~(4),计算步骤为

$$\Delta x_2 = \Delta x_1 \times b = (A_{2X} - A_{1X}) \times b = 4.18$$

$$\Delta y_2 = \Delta y_1 \times b = (A_{2Y} - A_{1Y}) \times b = 6.6$$

$$B_{2X} = B_{1X} + \Delta x_2 = 495$$

$$B_{2Y} = B_{1Y} + \Delta y_2 = 587.6$$

3.3 主瓣和旁瓣光斑合并

因为 $b>1$,所以采集的主瓣光斑相对旁瓣光斑的放大比例为 b ,为了以旁瓣光斑为基准进行主瓣和旁瓣合并,需要对两个光斑大小进行归一化,即将主瓣光斑水平和垂直方向尺度缩小原来的 $1/b(b>1)$ 后填充到旁瓣纹影小球区域.将点 (B_{2X}, B_{2Y}) 缩小后的坐标为 (B'_{2X}, B'_{2Y}) , $B'_{2X} = 495/b = 430.4$, $B'_{2Y} = 587.6/b = 510.9$.纹影小球中心在主瓣光斑缩小后对应的位置 $(430.4, 510.9)$,记作 (zbx, zby) .

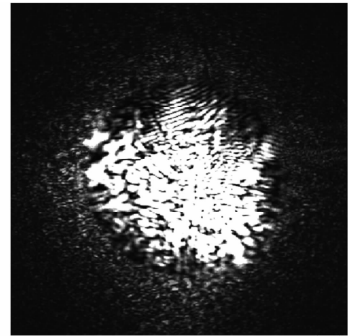
在图像合并时,首先新建一个空白合并图像,以 (pbx, pby) 为圆心,半径大于 $pbrr$ 的合并图像用旁瓣光斑对应位置数据替换;半径小于 $pbrr$ 的合并图像以 (zbx, zby) 为圆心半径小于 $pbrr$ 光强放大 K 倍后的主瓣光斑数据替换.为了消除纹影小球图像边缘不规则而产生的拼接缝,将实际拼接半径以 $pbrr$ 为基础增加5个像素.

3.4 采用加权平均法对拼接边界进行融合

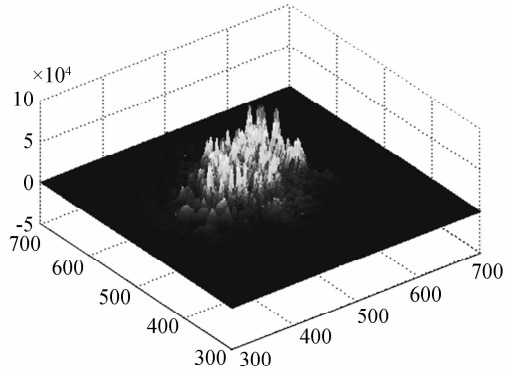
主瓣旁瓣光斑由于放大尺度不一样,在拼接缝附近存在灰度差,需要使用图像融合算法消除台阶.根据纹影法拼接边界是圆环的特点,本文选择渐入渐出加权平均法^[12].假设 f 代表融合后的图像, f_1 和 f_2 分别代表主瓣光斑和旁瓣光斑,则有

$$f(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y) & (x, y) \in f_1 \\ d_1 f_1(x, y) + d_2 f_2(x, y) & (x, y) \in (f_1 \cap f_2) \\ f_2(x, y) & (x, y) \in f_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中, d_1 和 d_2 分别代表权重值,且 $d_1 + d_2 = 1, 0 < d_1 < 1, 0 < d_2 < 1$.在渐入渐出的图像融合算法中, d_1 由1渐变至0,而 d_2 由0渐变至1,通过该图像融合算法可以在图像重叠区域中由主瓣光斑 f_1 慢慢过渡到旁瓣光斑 f_2 .过渡带如图3中的C区域所示,为主瓣光斑和旁瓣光斑的重合区域,本文选择宽度为20像素的圆环作为过渡带.使用渐入渐出加权平均法对合并图像的拼接边缘进行图像融合处理,效果如图9,合并图像的最大值为67661.



(a) Two dimensional reconstructed image



(b) Three dimensional reconstructed image

图9 重构图像

Fig. 9 The reconstructed image

4 实验结果分析

通过对纹影重构算法4个方面的改进,圆拟合法计算纹影小球中心比重心法误差从1.0像素减小为0.1像素;在纹影小球不能精确放置在旁瓣图像中心的情况下使用标定法计算也能准确计算纹影小球中心对应主瓣图像的位置,提高了重构图像的精度;使用图像融合方法消除了主瓣旁瓣光斑拼接缝的台阶;主瓣重叠部分均值与合并图像相同部分均值的偏差为0.042,而旁瓣重叠部分均值与合并图像相同部分均值的偏差为0.029,偏差都小于5%,满足设计指标.从图9(b)可以看出,重构后的远场焦瓣峰值67661,和使用动态范围为1000:1的CCD对原始焦斑进行测量的最大值68000之间的相对误差为0.005,而合并图像中心光强和旁瓣图像纹影小球轮廓边缘图像的光强之比为1200,大于1000:1.而从图10重构图像的桶中功率

(Power In the Bucket, PIB)曲线^[5]可以看出,重构的焦斑远场分布更接近于理论上实际焦斑的远场分布,因此,通过对纹影重构方法的改进,使得 CCD 测量的线性动态范围扩展了约 4 个数量级,实现了大动态范围远场焦斑的测量.

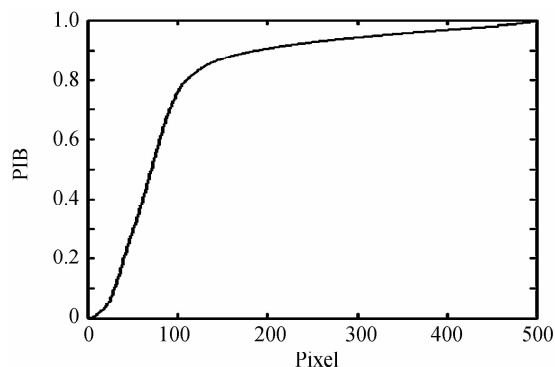


图 10 重构图像的 PIB 曲线

Fig. 10 The PIB curves of reconstructed image

在纹影重构过程,出现纹影小球无法准确挡住旁瓣图像中心的情况,这样就使得旁瓣图像的边缘部分出现饱和,因为 CCD 具有饱和溢出效应,如果中心饱和的情况下,饱和溢出区域的图像数据也不准确,所以

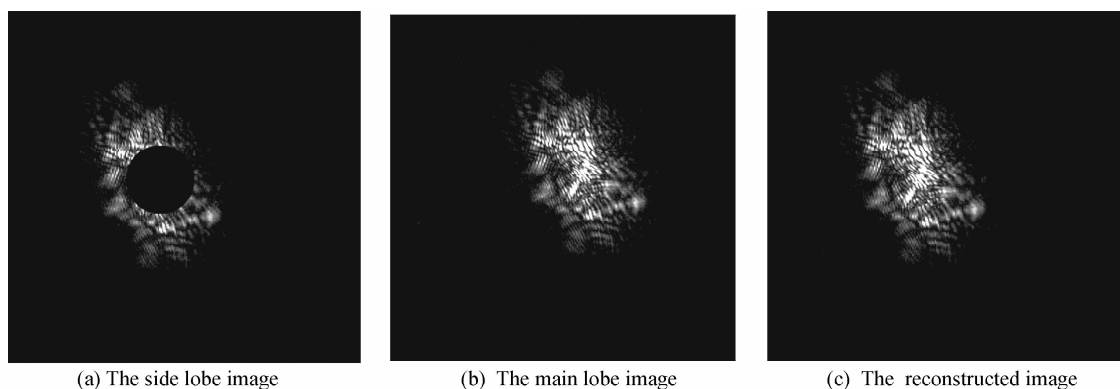


图 11 算法验证图像

Fig. 11 The image used to verify the schlieren reconstructed algorithm

以主瓣光强放大系数 $b=1$, 仿真实验中主瓣光斑放大系数 $K=2$, 采用文中的重构算法所得的重构图像如图 11(c). 为了验证重构图像的准确性, 通过计算主瓣图像和重构图像的相关系数即可判断两个图像是否相同或者相似, 两幅图像相关系数为^[13]

$$r(x, y) = \frac{\sum_{s=0}^K \sum_{t=0}^J \omega(s, t) f(x+s, y+t)}{[\sum_{s=0}^K \sum_{t=0}^J \omega^2(s, t) \cdot \sum_{s=0}^K \sum_{t=0}^J f^2(x+s, y+t)]^{1/2}} \quad (15)$$

式中 $f(x, y)$ 为大小 $M \times N$ 的图像, $\omega(x, y)$ 表示大小为 $J \times K$ 的子图像, 其中 $x=0, 1, 2, \dots, N-K, y=0, 1, 2, \dots, M-J$. 通过计算主瓣光斑和重构光斑的相关系数为 0.963 31, 所以计算主瓣光斑和重构光斑相似, 重构图像的准确率达 96%, 可以确定, 该重构算法是真实可靠的.

将纹影小球边缘部分的饱和区域以及周围区域用相应位置的主瓣图像数据乘以光强放大系数后进行替换, 以尽可能保证拼接图像的真实性.

纹影重构算法的误差主要受到标定主瓣光强放大系数 K 和光斑缩放系数 b 的影响, 因为标定光源能量比较小, 信噪比相对较大, 对主瓣光强放大系数 K 的影响比较大, 所以在主瓣光强放大系数 K 标定前要先对标定图像进行去噪处理, 对于最终标定结果要根据主瓣光斑的理论衰减值来判断标定的准确性. 而重构算法的受限因素主要以下几个方面: 由于光束在传输过程中经过多个光学元件, 所以测量到的主瓣光斑分布很不均匀, 这样主瓣和旁瓣光斑很难准确拼接; 由于使用纹影小球遮挡光斑中心使得旁瓣光斑的周围产生衍射光斑, 对旁瓣数据有一定的影响; 另外在拼接时主瓣光斑外围能量少部分将被忽略掉, 这样对于拼接的真实度也有一定的影响, 这些将在后续实验中克服.

为了对纹影重构方法的准确性进行评价, 在主瓣光路和旁瓣光路衰减倍率相同的情况下, 用纹影小球挡住旁瓣中心测到旁瓣光斑, 所得旁瓣和主瓣光斑如图 11(a)、(b). 因为主瓣和旁瓣光路衰减系数相同, 所

5 结论

本文在分析纹影法测量原理的基础上, 建立了纹影重构的数学模型, 通过圆拟合法计算纹影小球中心; 通过标定法计算纹影小球中心在主瓣图像上的对应位置; 利用标定的主瓣光强放大系数 K 和光斑缩放系数 b 对图像进行合并, 采用函数加权平均法对图像进行融合, 消除了图像边缘部分的灰度差. 通过改进和对重构步骤的简化, 使得重构图像重叠部分平均相对偏差小于 0.05, 测量动态范围接近 4 个数量级, 满足了打靶实验对于大动态范围远场焦斑测量的要求.

参考文献

- [1] LAWSON J K, RENARD P A, HENESIAN M A, *et al.* Focal spot characterization[C]. SPIE, 1996, **3047**:800-808.
- [2] SPAETH M L, MANES K R, WIDMAYER C C. The

- national ignition facility wavefront requirements and optical architecture[C]. SPIE, 2004, **5341**:25-42.
- [3] WILLIAMS W H, JEROME M, *et al* . Optical propagation modeling for the national ignition facility[C]. SPIE, 2004, **5341** :66-72.
- [4] ZHOU Ji-quan, WANG Qing. Camera array-based HDR image synthesis method[J]. *Application Research of Computers*. 2013, **30**(9), 88-92.
周继权,王庆. 基于相机阵列的高动态范围图像合成方法[J]. 计算机应用研究. 2013, **30**(9), 88-92.
- [5] HE Yuan-xing, LI Xin-yang. Far-field focal spot measurement based on diffraction grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(2): 1-8.
贺元兴,李新阳. 基于衍射光栅的远场焦斑测量新方法[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 1-8.
- [6] XIE Xu-dong, CHEN Bo, HE Ling, *et al*. Algorithm research on focal spot reconstruction for high power laser output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3):237-240.
谢旭东,陈波,何凌,等. 强激光远场焦斑重构算法研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(3):237-240.
- [7] HE Ling, CHEN Bo, LIU Hua, *et al*. Experimental investigation in far-field test technique for high power laser output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15** (3):245-248.
何凌,陈波,刘华,等. 激光远场焦斑测试技术的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(3):245-248.
- [8] CHENG Juan, QIN Xing-wu, CHEN Bo, *et al*. Experimental investigation on focal spot measurement by schlieren method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4):612-614.
程娟,秦兴武,陈波等. 纹影法测量远场焦斑实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(4):612-614.
- [9] KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yu-shan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. *The Infrared and Laser Engineering*, 2001, **31**(3): 275-279.
孔兵,王昭,谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. 红外与激光工程, 2001, **31**(3): 275-279.
- [10] 章毓晋. 图像工程图像分析(中册 第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 222-223.
- [11] SUN Li-hui, WANG Yong-zhong, ZHOU Bing. Self-adaptive infrared image background suppressed algorithm based on local statistical character [J]. *The Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1):177-180.
孙立辉,王永仲,周冰. 基于局部统计特征的自适应红外背景抑制算法[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(1):177-18.
- [12] SHAO Xiang-xin. Study on key algorithm of digital image mosaic[D], JiLin: JiLin University.
邵向鑫, 数字图像拼接核心算法研究[D], 吉林: 吉林大学, 2010.
- [13] 张铮,王艳平. 数字图像处理与机器视觉——Visual C++与Matlab实现[M]. 人民邮电出版社. 2013:428-433.